



EP04150349 23 APR. 2004

REC:	10 JUN 2004
WIPO	PCT

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 31 MARS 2004

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Martine PLANCHE".

Martine PLANCHE

PRIORITY DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIETE
INDUSTRIELLE

SIEGE
26 bis, rue de Saint Petersburg
75800 PARIS cedex 08
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23
www.inpi.fr

BEST AVAILABLE COPY



INSTITUT
NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 94 86 54

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



N° 11354°01

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE 1/2

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 540 W /260899

REMISE DES PIÈCES	Réserve à l'INPI
DATE	25 MARS 2003
LIEU	75 INPI PARIS
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI	0303645
DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE PAR L'INPI	25 MARS 2003
Vos références pour ce dossier (facultatif)	63012

<input checked="" type="checkbox"/> NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE
Mme Sophie ESSELIN THALES INTELLECTUAL PROPERTY 31-33 avenue Aristide Briand 94117 ARCTHE CEDEX

Confirmation d'un dépôt par télécopie <input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie	
<input checked="" type="checkbox"/> NATURE DE LA DEMANDE	Cochez l'une des 4 cases suivantes
Demande de brevet	<input checked="" type="checkbox"/>
Demande de certificat d'utilité	<input type="checkbox"/>
Demande divisionnaire	<input type="checkbox"/>
Demande de brevet initiale ou demande de certificat d'utilité initiale	N° Date / / /
Transformation d'une demande de brevet européen Demande de brevet initiale	N° Date / / /

3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)

GYROLASER A ETAT SOLIDE STABILISE

<input checked="" type="checkbox"/> DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE		Pays ou organisation Date / / / N°
		Pays ou organisation Date / / / N°
		Pays ou organisation Date / / / N°
		<input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé « Suite »
<input checked="" type="checkbox"/> DEMANDEUR		<input type="checkbox"/> S'il y a d'autres demandeurs, cochez la case et utilisez l'imprimé « Suite »
Nom ou dénomination sociale		THALES
Prénoms		
Forme juridique		Société Anonyme
N° SIREN		15 5 2 0 5 9 0 2 4
Code APE-NAF		
Adresse	Rue	173 boulevard Haussmann
	Code postal et ville	75008 PARIS
Pays		FRANCE
Nationalité		Française
N° de téléphone (facultatif)		
N° de télécopie (facultatif)		
Adresse électronique (facultatif)		

BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE 2/2

Béserné à l'INPI

REMISE DES PIÈCES 2005
DATE 75 INPI PARIS
LIEU 0303645

N° D'ENREGISTREMENT
NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI

DD 540 W /260899

6 MANDATAIRE Nom : ESSELIN Prénom : Sophie Cabinet ou Société : THALES N ° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel : 8325 Adresse : Rue 31-33 avenue Aristide Briand Code postal et ville : 94117 ARCUEIL CEDEX N ° de téléphone (facultatif) : 01 41 48 45 24 N ° de télécopie (facultatif) : 01 41 48 45 01 Adresse électronique (facultatif) :	
7 INVENTEUR (S) Les inventeurs sont les demandeurs : <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non Dans ce cas fournir une désignation d'inventeur(s) séparée	
8 RAPPORT DE RECHERCHE Établissement immédiat ou établissement différé : <input checked="" type="checkbox"/> Paiement échelonné de la redevance : Paiement en trois versements, uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non	
9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requise pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Requise antérieurement à ce dépôt (joindre une copie de la décision d'admission pour cette invention ou indiquer sa référence):	
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes	
10 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)  Sophie ESSELIN	VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI P. BERNOUIS

GYROLASER A ETAT SOLIDE STABILISE

Le domaine de l'invention est celui des gyrolasers à état solide utilisés pour la mesure des vitesses de rotation. Ce type d'équipement est notamment utilisé pour les applications aéronautiques.

5

Le gyrolaser, mis au point il y a une trentaine d'années, est largement commercialisé et utilisé de nos jours. Son principe de fonctionnement est fondé sur l'effet Sagnac, qui induit une différence de fréquence $\Delta\nu$ entre les deux modes optiques d'émission se propageant en sens opposé, dits contre-propageants, d'une cavité laser en anneau bidirectionnelle animée d'un mouvement de rotation. Classiquement, la différence de fréquence $\Delta\nu$ est égale à :

$$\Delta\nu = 4A\Omega / \lambda L$$

15

où L et A sont respectivement la longueur et l'aire de la cavité ; λ est la longueur d'onde d'émission laser hors effet Sagnac ; Ω est la vitesse de rotation de l'ensemble.

20

La mesure de $\Delta\nu$ obtenue par analyse spectrale du battement des deux faisceaux émis permet de connaître la valeur de Ω avec une très grande précision.

25

On démontre également que le gyrolaser ne fonctionne correctement qu'au-delà d'une certaine vitesse de rotation nécessaire pour diminuer l'influence du couplage entre modes. La plage de vitesse de rotation située en deçà de cette limite est appelée classiquement zone aveugle.

30

La condition d'observation du battement, et donc de fonctionnement du gyrolaser, est la stabilité et la relative égalité des intensités émises dans les deux directions. Son obtention n'est pas a priori chose aisée en raison du phénomène de compétition entre modes, qui fait que l'un des deux modes contre-propageants peut avoir tendance à monopoliser le gain disponible, au détriment de l'autre mode.

Ce problème est résolu dans les gyrolasers usuels par l'utilisation d'un milieu d'amplification gazeux, généralement un mélange d'Hélium-Néon, fonctionnant à température ambiante. La courbe de gain du mélange gazeux présente un élargissement Doppler dû à l'agitation thermique des atomes.

5 Les seuls atomes susceptibles de fournir du gain à un mode de fréquence donnée sont ainsi ceux dont la vitesse induit un décalage Doppler de la fréquence de transition qui amène l'atome à résonance avec le mode en question. En forçant l'émission laser à avoir lieu ailleurs qu'au centre de la courbe de gain (par ajustement piézoélectrique de la longueur du chemin 10 optique), on s'assure que les atomes à résonance avec la cavité ont une vitesse non nulle. Ainsi, les atomes pouvant contribuer au gain dans l'une des deux directions ont des vitesses opposées à celles des atomes pouvant contribuer au gain dans la direction opposée. Tout se passe donc comme s'il y avait deux milieux amplificateurs indépendants, un pour chaque direction.

15 La compétition entre les modes ayant ainsi disparu, on obtient une émission bidirectionnelle stable et équilibrée (en pratique, pour pallier d'autres problèmes, on utilise un mélange de deux isotopes différents du Néon).

Le caractère gazeux du milieu amplificateur est toutefois une source de complications techniques lors de la réalisation du gyrolaser 20 (notamment en raison de la grande pureté de gaz requise) et d'usure prématuée lors de son utilisation (fuite de gaz, détérioration des électrodes, haute tension utilisées pour établir l'inversion de population...).

Actuellement, il est possible de réaliser un gyrolaser à état solide 25 fonctionnant dans le visible ou le proche infra-rouge en utilisant, par exemple, un milieu amplificateur à base de cristaux de YAG (Yttrium-Aluminium-Grenat) dopé au Néodyme à la place du mélange gazeux Hélium-Néon, le pompage optique étant alors assuré par des diodes laser fonctionnant dans le proche infra-rouge. On peut également utiliser comme 30 milieu amplificateur un matériau semi-conducteur, une matrice cristalline ou un verre dopé avec des ions appartenant à la classe des terres rares (Erbium, Ytterbium...). On supprime ainsi, de facto, tous les problèmes inhérents à l'état gazeux du milieu amplificateur. Toutefois, une telle 35 réalisation est rendue très difficile par le caractère homogène de l'élargissement de la courbe de gain des milieux solides qui induit une très

forte compétition entre modes et l'existence d'un grand nombre de régimes de fonctionnement différents, parmi lesquels le régime bidirectionnel équilibré en intensité (dit "régime de battement") est un cas particulier très instable (N. Kravtsov, E. Lariontsev, Self-modulation oscillations and relaxations processes in solid-state ring lasers, Quantum Electronics 24 (10) 841-856 (1994)). Cet obstacle physique majeur a fortement limité jusqu'à maintenant le développement des gyrolasers à état solide.

Pour pallier cet inconvénient, une solution technique consiste à atténuer les effets de la compétition entre modes contre-propageants dans un laser en anneau à état solide en introduisant dans la cavité des pertes optiques dépendantes du sens de propagation du mode optique et de son intensité. Le principe est de moduler par un dispositif d'asservissement ces pertes en fonction de la différence d'intensité entre les deux modes émis afin de favoriser le mode le plus faible au détriment de l'autre, de façon à constamment asservir l'intensité des deux modes contre-propageants à une valeur commune.

En 1984, il a été proposé de réaliser un dispositif d'asservissement dans lequel les pertes étaient obtenues au moyen d'un ensemble optique composé essentiellement d'un élément à effet Faraday variable et d'un élément polarisant (A.V. Dotsenko, E.G. Lariontsev, Use of a feedback circuit for the improvement of the characteristics of a solid-state ring laser, Soviet Journal of Quantum Electronics 14 (1) 117-118 (1984) — A.V. Dotsenko, L.S. Komienko, N.V. Kravtsov, E.G. Lariontsev, O.E. Nanii, A.N. Shelaev, Use of a feedback loop for the stabilization of a beat regime in a solid-state ring laser, Soviet Journal of Quantum Electronics 16 (1) 58-63 (1986)).

Le principe de ce dispositif d'asservissement est illustré en figure 30 1. Il consiste à introduire dans une cavité 1 en anneau, constituée de 3 miroirs 11, 12 et 13 et d'un milieu amplificateur 19, un ensemble optique 35 disposé sur le trajet des modes optiques contre-propageants 5 et 6, ledit ensemble étant constitué d'un élément polarisant 71 et d'un barreau optique 72 à effet Faraday entouré d'une bobine d'induction 73. A la sortie de la cavité, les deux modes optiques 5 et 6 sont envoyés sur une photodiode de

mesure 3. Une partie de ces faisceaux 5 et 6 est prélevée au moyen des deux lames semi-réfléchissantes 43 et envoyée sur les deux photodétecteurs 42. Les signaux issus de ces deux photodétecteurs sont représentatifs de l'intensité lumineuse des deux modes optiques contre-propageants 5 et 6.

5 Lesdits signaux sont envoyés à un module électronique d'asservissement 4, qui génère une intensité électrique proportionnelle à la différence d'intensité lumineuse entre les deux modes optiques. Cette intensité électrique détermine la valeur des pertes infligées à chacun des modes contre-propageants 5 et 6. Si un des faisceaux a une intensité lumineuse supérieure

10 à l'autre, son intensité sera plus atténuee, de façon à ramener les faisceaux de sortie au même niveau d'intensité. On stabilise ainsi le régime bidirectionnel en intensité.

Un gyrolaser à état solide ne peut fonctionner, selon ce principe, que si les paramètres du dispositif d'asservissement sont adaptés à la dynamique du système. Pour que le dispositif d'asservissement puisse donner des résultats corrects, trois conditions doivent être remplies :

- 15 ○ Les pertes supplémentaires introduites dans la cavité par le dispositif d'asservissement doivent être du même ordre de grandeur que les pertes propres de la cavité.
- 20 ○ La vitesse de réaction du dispositif d'asservissement doit être supérieure à la vitesse de variation des intensités des modes émis de façon que l'asservissement fonctionne de façon satisfaisante.
- 25 ○ Enfin, la force de rétroaction du dispositif d'asservissement doit être suffisante pour que l'effet induit dans la cavité compense efficacement les variations d'intensité.

Les équations dites de Maxwell-Bloch permettent de connaître les amplitudes complexes $E_{1,2}$ des champs des modes optiques contre-propageants, ainsi que la densité N d'inversion de population. Elles sont obtenues en utilisant un modèle semi-classique (N. Kravtsov, E. Lariotsev, Self-modulation oscillations and relaxations processes in solid-state ring lasers, Quantum Electronics 24(10) 841-856 (1994)).

35 Ce sont :

$$\text{Equation 1 : } dE_{1,2}/dt = -(\omega/2Q_{1,2})E_{1,2} + i(m_{1,2}/2)E_{2,1} \pm i(\Delta\nu/2)E_{1,2} + (\sigma/2T)(E_{1,2}\int^L N dx + E_{2,1}\int^L N e^{\pm 2ikx} dx)$$

$$\text{Equation 2 : } dN/dt = W - (N/T_1) - (a/T_1)N |E_1 e^{-ikx} + E_2 e^{ikx}|^2$$

où

5 les indices 1 et 2 sont représentatifs des deux modes optiques contre-propageants ;

ω est la fréquence d'émission laser hors effet Sagnac ;

10 $Q_{1,2}$ sont les facteurs de qualité de la cavité dans les deux sens de propagation ;

$m_{1,2}$ sont les coefficients de rétrodiffusion de la cavité dans les deux sens de propagation ;

σ est la section efficace d'émission laser ;

ℓ est la longueur de milieu à gain traversée ;

$T = L/c$ est le temps de parcours de chaque mode de la cavité ;

15 $k = 2\pi/\lambda$ est la norme du vecteur d'onde ;

W est le taux de pompage ;

T_1 est la durée de vie du niveau excité ;

a, paramètre de saturation, est égal à $\sigma T_1 / 8\pi\hbar\omega$.

20 Le second membre de l'équation 1 comprend quatre termes. Le premier terme correspond à la variation du champ due aux pertes de la cavité, le second terme correspond à la variation du champ induit par la rétrodiffusion d'un mode sur l'autre mode en présence d'éléments diffusants présents à l'intérieur de la cavité, le troisième terme correspond à la variation du champ due à l'effet Sagnac et le quatrième terme correspond à la variation du champ due à la présence du milieu amplificateur. Ce quatrième terme a deux composantes, la première correspond à l'émission stimulée, la seconde à la rétrodiffusion d'un mode sur l'autre mode en présence d'un réseau d'inversion de population au sein du milieu amplificateur.

25 30 Le second membre de l'équation 2 comprend trois termes, le premier terme correspond à la variation de la densité d'inversion de population due au pompage optique, le second terme correspond à la variation de la densité d'inversion de population due à l'émission stimulée et le troisième terme correspond à la variation de la densité d'inversion de population due à l'émission spontanée.

Les pertes moyennes P_c dues à la cavité après une rotation complète du mode optique valent par conséquent :

5 $P_c = \omega T / 2Q_{1,2}$ selon le premier terme du second membre de l'équation 1.

Les pertes introduites par les dispositifs d'asservissement P_A doivent être du même ordre de grandeur que ces pertes moyennes P_c . Ces pertes sont généralement de l'ordre du pour cent.

10 La vitesse de réaction du dispositif d'asservissement peut être caractérisée par la bande passante γ dudit dispositif d'asservissement. On démontre, en utilisant les équations 1 et 2 (A.V. Dotsenko, E.G. Lariontsev, Use of a feedback circuit for the improvement of the characteristics of a solid-state ring laser, Soviet Journal of Quantum Electronics 14 (1) 117-118 (1984))

15 — A.V. Dotsenko, L.S. Komienko, N.V. Kravtsov, E.G. Lariontsev, O.E. Nanii, A.N. Shelaev, Use of a feedback loop for the stabilization of a beat regime in a solid-state ring laser, Soviet Journal of Quantum Electronics 16 (1) 58-63 (1986)), qu'une condition suffisante d'établissement du régime bidirectionnel stable au-delà de la vitesse de rotation peut s'écrire :

20 $\gamma > \eta \omega / [Q_{1,2}(\Delta v T_1)^2]$
avec $\eta = (W - W_{\text{seuil}})/W$.

η correspond au taux relatif de pompage au-dessus du seuil W_{seuil} .
A titre d'exemple, pour un taux relatif de pompage η de 10%, une fréquence optique ω de $18 \cdot 10^{14}$, un facteur de qualité $Q_{1,2}$ de 10^7 , une différence de fréquence Δv de 15 kHz et une durée de vie du niveau excité T_1 de 0,2 ms, la bande passante γ doit être supérieure à 40 kHz.

Pour que la boucle fonctionne correctement, la relation suivante doit également être vérifiée : $(\Delta v T_1)^2 >> 1$.

30 Classiquement, la force de rétroaction du dispositif d'asservissement q est définie de la façon suivante :

$$q = [(Q_1 - Q_2)/(Q_1 + Q_2)] / [(I_2 - I_1)/(I_2 + I_1)]$$
 avec I_1 , I_2 intensités lumineuses des deux modes contre-propageants.

Dans ce type d'application, on démontre que le paramètre q doit être supérieur à $1/(\Delta v T_1)^2$ pour que le dispositif d'asservissement puisse fonctionner correctement.

5 L'objet de notre invention est de proposer un dispositif stabilisateur pour gyrolaser à état solide, qui est constitué d'un système d'asservissement infligeant des pertes optiques dépendant du sens de propagation en se fondant sur la combinaison de trois effets physiques : la rotation réciproque, la rotation non réciproque et la polarisation. Le dispositif
10 stabilisateur selon l'invention permet d'obtenir les conditions nécessaires au bon fonctionnement du gyrolaser.

Il y a effet optique non réciproque dans un composant optique lorsque, la lumière ayant un état de polarisation initial, l'état de polarisation de la lumière est différent de cet état initial après un aller-retour dans ledit composant. Les matériaux à effet Faraday sont des matériaux qui, lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, font tourner la direction de polarisation d'un faisceau polarisé linéairement qui les traverse. Cet effet n'est pas réciproque. Ainsi, le même faisceau venant en sens inverse subira une rotation de sa direction de polarisation dans le même sens. Ce principe est illustré en figure 2a. La direction de polarisation 51 du faisceau 5 polarisé linéairement subit une rotation d'un angle β lorsqu'elle traverse le composant à effet Faraday 8 dans le sens direct (schéma supérieur de la figure 2a). Si l'on réinjecte dans le composant à effet Faraday un faisceau identique 6 se propageant dans le sens opposé et dont la direction de polarisation est initialement tournée de β , sa direction de polarisation 51 tourne à nouveau de l'angle β en traversant le composant, l'angle de rotation total faisant alors 25 2β après un aller-retour (schéma central de la figure 2a). Dans un composant classique à effet réciproque 7, la direction de polarisation 51 aurait tourné de – β , de façon à retrouver sa position initiale (schéma inférieur de la figure 30 2a).

Plus précisément, l'invention a pour objet un gyrolaser comportant au moins une cavité optique en anneau comprenant au moins trois miroirs, 35 un milieu amplificateur à l'état solide et un système d'asservissement, la

cavité et le milieu amplificateur étant tels que deux modes optiques dits contre-propageants peuvent se propager en sens inverse l'un de l'autre à l'intérieur de ladite cavité optique, le système d'asservissement permettant de maintenir la quasi-égalité d'intensité des deux modes contre-propageants,

5 le système d'asservissement comportant au moins, à l'intérieur de la cavité, un ensemble optique comprenant un élément polarisant, un dispositif à effet non réciproque agissant sur l'état de polarisation des modes contre-

non réciproque, caractérisé en ce que ledit ensemble optique comporte également un dispositif à effet réciproque agissant également sur l'état de

10 polarisation des modes contre-propageants, le système d'asservissement comportant des moyens de réglage permettant de régler au moins l'un des effets desdits dispositifs à effet réciproque et non réciproque.

Deux grands choix techniques sont alors possibles :

15

- o Soit l'effet réciproque est fixe, dans ce cas, l'effet non réciproque doit être réglable pour que le dispositif d'asservissement puisse fonctionner.
- o Soit l'effet non réciproque est fixe, dans ce cas, l'effet réciproque doit être réglable pour que le dispositif d'asservissement puisse fonctionner.

20

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre donnée à titre non limitatif et grâce aux figures annexées parmi lesquelles :

25

- o La figure 1 représente le principe de fonctionnement du dispositif d'asservissement selon l'art antérieur.
- o La figure 2a représente le principe de l'effet Faraday, non réciproque.
- o La figure 2b représente le principe général du dispositif permettant d'induire des pertes dépendantes du sens de propagation selon l'invention.
- o La figure 3 représente le schéma général du dispositif d'asservissement selon l'invention.
- o La figure 4 représente le principe général de l'effet réciproque introduit par une cavité non planaire.

30

35

- La figure 5 représente la vue générale d'une cavité monolithique.
- La figure 6 représente la vue générale d'un gyrolaser comprenant une cavité monolithique.
- La figure 7 représente le schéma de principe d'une cavité non planaire et monolithique.
- Les figures 8a et 8b représentent les schémas de principe de la création d'un champ magnétique variable dans une cavité monolithique à effet Faraday.
- La figure 9 représente le schéma de principe de la création d'un champ magnétique fixe dans une cavité monolithique à effet Faraday.
- La figure 10 représente le schéma de principe d'une cavité gyrolaser réalisée à base de fibres optiques.

Le principe de la combinaison d'un effet optique réciproque et d'un effet optique non réciproque est illustré sur l'exemple de la figure 2b dans le cas où les effets réciproques et non réciproques sont simplement des rotations de la polarisation linéaire. Les deux schémas de cette figure représentent une partie d'une cavité en anneau dans laquelle peuvent circuler deux faisceaux optiques contre-propageants 5 et 6. Cette cavité comporte, entre autres, un ensemble optique constitué d'un polariseur linéaire 71, d'un premier élément à effet réciproque 7 agissant sur la direction de polarisation de la lumière polarisée linéairement et d'un second élément à effet non réciproque 8 agissant également sur la direction de la polarisation de la lumière. Pour des raisons de clarté, la partie de la cavité comprenant cet ensemble optique a été représentée en ligne. L'indication de direction de polarisation des faisceaux optiques a été représentée par une flèche. Le premier élément 7 fait tourner la polarisation de la lumière d'un angle α dans le sens direct et le second élément 8 fait tourner la polarisation d'un angle β également dans le sens direct. L'élément 7 peut notamment être une lame demi-onde dont l'axe est tourné d'un angle de $\alpha/2$ par rapport à l'axe de polarisation du polariseur linéaire 71. L'élément 8 peut être un rotateur de Faraday comme précédemment cité. Soit un premier faisceau optique 5 polarisé linéairement par le polariseur linéaire 71 et traversant



successivement le premier et le second élément comme illustré sur le schéma du haut de la figure 2b, après la traversée du premier élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle α et, après la traversée du second élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle θ_{direct} égal à $\alpha+\beta$. Lorsque ce faisceau passe de nouveau, après un tour complet, à travers le polariseur linéaire 71, sa transmission T_{directe} relative sera de :

$$T_{\text{directe}} = \cos^2(\alpha+\beta).$$

Soit encore, dans le cas où les angles de rotation ont des valeurs faibles, une perte P_{directe} relative d'intensité de :

$P_{\text{directe}} = (\alpha+\beta)^2$ obtenue en faisant un développement limité au second ordre de la fonction cosinus.

Soit un second faisceau optique 6 polarisé linéairement et traversant successivement en sens opposé par rapport au premier faisceau 5 le second puis le premier élément comme illustré sur le schéma du bas de la figure 2b, après la traversée du second élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle β et, après la traversée du premier élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle θ_{inverse} égal à $-\alpha+\beta$. Lorsque ce faisceau passe à travers un polariseur linéaire dont l'axe est orienté parallèlement à la direction de polarisation initiale du faisceau, sa transmission T_{inverse} relative sera de :

$$T_{\text{inverse}} = \cos^2(\beta-\alpha).$$

Soit encore, dans le cas où les angles de rotation ont des valeurs faibles, une perte P_{inverse} relative d'intensité de :

$P_{\text{inverse}} = (\beta-\alpha)^2$ obtenue en faisant un développement limité au second ordre de la fonction cosinus.

Par conséquent, les pertes dans le sens inverse de propagation sont différentes de celles enregistrées dans le sens direct, ce qui correspond bien au résultat recherché. Il est ainsi possible de faire varier de façon différente les intensités des modes contre-propageants en faisant varier un des deux angles de rotation α ou β .

Bien entendu, l'exemple précédent peut être généralisé à toute combinaison d'effet réciproque et d'effet non réciproque agissant sur l'état de polarisation de la lumière telle que ladite combinaison puisse être transformée en variation d'intensité lumineuse par un élément polarisant.

Dans une cavité réelle, différents types de composants (miroirs de la cavité, milieu amplificateur, polariseurs...) peuvent influencer l'état de polarisation des faisceaux optiques ainsi que leur intensité. Pour connaître exactement l'état de polarisation des faisceaux contre-propageants après un tour complet de la cavité, on utilise le formalisme des matrices de Jones. Celui-ci consiste à représenter l'influence d'un composant sur l'état de polarisation par une matrice 2×2 référencée dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation des faisceaux. En général, les axes du repère choisi correspondent aux axes principaux d'un polariseur intra-cavité, ce qui facilite la représentation mathématique. Pour connaître l'influence résultante de l'ensemble des composants intra-cavité, il suffit alors de déterminer les états propres du produit des différentes matrices représentatives de ces composants. Ce produit n'étant pas forcément commutatif, l'influence pourra être différente selon le sens de propagation des faisceaux.

Dans l'exemple illustré en figure 2b, la matrice de Jones M_{directe} d'une cavité comportant le polariseur 71, l'élément à effet réciproque 7 et l'élément à effet non réciproque 8 s'écrit dans le sens direct :

$$M_{\text{directe}} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha + \beta) \end{bmatrix}$$

La polarisation résultante après un tour complet est une polarisation linéaire inclinée d'un angle $\alpha + \beta$ par rapport à l'axe de polarisation du polariseur et la transmission en intensité à travers le polariseur vaut $\cos(\alpha + \beta)^2$.

La matrice de Jones $M_{\text{indirecte}}$ de la même cavité comportant le polariseur 71, l'élément à effet réciproque 7 et l'élément à effet non réciproque 8 s'écrit dans le sens indirect :

$$M_{\text{indirecte}} = \begin{bmatrix} \cos(-\alpha + \beta) & -\sin(-\alpha + \beta) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La polarisation résultante après un tour complet est une polarisation linéaire inclinée d'un angle $-\alpha+\beta$ par rapport à l'axe de polarisation du polariseur et la transmission à travers le polariseur en intensité vaut $\cos(-\alpha + \beta)^2$.

5

La figure 3 représente le schéma d'ensemble d'un gyrolaser selon l'invention. Il comprend une cavité 1 en anneau constituée d'au moins 3 miroirs 11, 12 et 13, d'un milieu amplificateur 19 à l'état solide et d'un ensemble optique disposé sur le trajet des modes optiques contre-propageants 5 et 6, ledit ensemble étant constitué d'un élément polarisant 71, d'un dispositif 7 à effet réciproque agissant sur l'état de polarisation des modes contre-propageants et un dispositif 8 à effet non réciproque agissant également sur l'état de polarisation des modes contre-propageants, au moins l'un des effets desdits dispositifs étant réglable. A la sortie de la cavité, les deux modes optiques 5 et 6 sont envoyés sur une photodiode de mesure 3. Une partie de ces faisceaux 5 et 6 est prélevée au moyen des deux lames semi-réfléchissantes 43 et envoyée sur les deux photodétecteurs 42. Les signaux issus de ces deux photodétecteurs sont représentatifs de l'intensité lumineuse des deux modes optiques contre-propageants 5 et 6. Lesdits signaux sont envoyés à un module électronique d'asservissement 4 qui pilote, en fonction de l'intensité des signaux reçus, le dispositif à effet variable (flèches en pointillés sur le schéma). Cela va se traduire par des variations des états de polarisation des deux faisceaux contre-propageants. Ces variations d'état de polarisation entraînent ainsi des pertes optiques différentes sur les modes optiques contre-propageants 5 et 6 chaque fois qu'après avoir effectué une rotation complète les modes traversent de nouveau l'élément polarisant 71. Ces pertes sont fonction de l'intensité des faisceaux de sortie. Si l'un des faisceaux a une intensité lumineuse supérieure à l'autre, son intensité sera plus atténuee, de façon à ramener les faisceaux de sortie au même niveau d'intensité. On stabilise ainsi le régime bidirectionnel en intensité.

Il existe différents types d'éléments polarisants 71. L'élément polarisant peut être notamment un polariseur linéaire. Il peut être également obtenu par traitement sur un des miroirs de la cavité. Il est également

possible d'utiliser les propriétés de la réflexion sur l'interface entre deux milieux d'indices différents, par exemple en plaçant dans la cavité une lame de verre inclinée à l'angle de Brewster par rapport à la direction de propagation des modes 5 et 6 ou en taillant à l'incidence de Brewster une face de l'un des éléments présents dans la cavité (notamment le milieu amplificateur ou le dispositif à effet non réciproque).

5

Il existe différentes méthodes pour réaliser des dispositifs optiques à effet réciproque fixe.

10 On peut notamment utiliser, comme il est décrit sur les figures 4a et 4b, une cavité non planaire. Soit une cavité 1 comportant au moins quatre miroirs 11, 12, 13 et 14, il est possible de les disposer, comme indiqué sur la figure 4a, de telle sorte que les faisceaux contre-propageants se propagent dans un plan (plan (X,Y) de la figure 4a). Dans ce cas, la cavité n'induit pas de rotation réciproque sur les modes qui s'y propagent. Il est également possible de les disposer de telle sorte que les faisceaux contre-propageants ne se propagent plus dans un plan, comme il est indiqué, par exemple, sur la figure 4b, où le miroir 12 a été déplacé sur l'axe des Z. Dans ce cas, on démontre que la direction de polarisation des faisceaux contre-propageants a 15 tourné d'un angle dépendant de la géométrie de la cavité lorsque le faisceau a fait un tour complet de la cavité (A.C. Nilsson, E.K.Gustafson and R.L.Byer – Eigenpolarization Theory of Monolithic Nonplanar Ring Oscillators – IEEE 20 Journal of Quantum Electronics 25 (4) 767-790 (1989)). En d'autres termes, une cavité non planaire peut induire un effet de rotation réciproque sur les 25 modes qui s'y propagent, cet effet étant fixe et dépendant de la géométrie de la cavité.

Il est également possible de réaliser un dispositif à effet réciproque fixe en ajoutant dans la cavité un polariseur linéaire dont la 30 direction de polarisation n'est pas parallèle à celle de l'élément polarisant initial. Dans ce cas, l'angle de rotation réciproque α est égal à l'angle formé par les deux axes des éléments polarisants.

Enfin, il est possible d'obtenir l'effet réciproque fixe en ajoutant 35 dans la cavité une lame optique biréfringente. Si cette lame est une lame



demi-onde, l'angle de rotation α est alors le double de l'angle formé par l'axe de la lame demi-onde avec celui de l'élément polarisant. Bien entendu, cette lame demi-onde peut être rendue solidaire d'un des miroirs de la cavité, de façon à simplifier la réalisation du dispositif.

5

Pour réaliser un dispositif à effet réciproque variable, une solution possible consiste à utiliser un dispositif à biréfringence contrôlable. Pour induire une biréfringence contrôlable, on peut utiliser :

- o des céramiques au Plomb, Lantane, Zircinium et Titane ($Pb_1-xLa_xZr_{1-y}Ti_yO_3$), dont on peut contrôler à la fois l'orientation des axes neutres et la biréfringence dans une zone en l'entourant d'électrodes et en appliquant un champ électrique de quelques centaines de volts. Ces céramiques ont des épaisseurs de moins d'un millimètre, sont transmissives dans le proche infrarouge, ont des tensions de commandes de quelques centaines de volts et un temps de réponse de l'ordre de la microseconde compatible avec la bande passante nécessaire évaluée de quelques dizaines de kHz ;
- o des valves à cristaux liquide d'un millimètre d'épaisseur environ (dont la zone active a une épaisseur d'environ 20 microns) ayant des tensions de commande d'une centaine de volts ;
- o des cellules de Pockels, dont on modifie le déphasage en changeant la tension appliquée (typiquement 1kV pour que le déphasage obtenu soit égal à $\pi/2$). Ces cellules, constituées de KDP ou de Niobate de Lithium, par exemple, sont identiques à celles utilisées pour déclencher un laser. Elles ont des épaisseurs de un à deux centimètres et des pertes d'insertions nulles.

Pour réaliser un dispositif à effet non réciproque, on utilise généralement des dispositifs magnéto-optiques, par exemple à effet Faraday, qui nécessitent pour fonctionner la génération d'un champ magnétique. Ces éléments à effet Faraday peuvent être notamment réalisés directement sur les miroirs de la cavité au moyen de couches de matériau magnéto-optiques. Si l'on souhaite obtenir un effet non réciproque fixe, il suffit de réaliser un champ magnétique permanent au moyen de circuits magnétiques à base d'aimants. Si l'on souhaite obtenir un effet non

réciproque variable, il suffit alors de créer un champ magnétique variable, par exemple, au moyen d'une bobine d'induction entourant le matériau à effet Faraday.

Lorsque le milieu s'y prête, il est avantageux d'utiliser le milieu amplificateur comme milieu à effet Faraday. On simplifie de façon importante la réalisation de la cavité. Ainsi, le Néodyme-YAG, qui est utilisé comme milieu amplificateur pour les lasers fonctionnant dans le proche infrarouge, est susceptible de générer suffisamment d'effet Faraday pour être utilisé en tant que tel. En effet, sa constante de Vernet vaut environ $103^{\circ}\text{T}^{-1}\text{m}^{-1}$, ce qui est suffisant pour induire des rotations Faraday de l'ordre du degré pour une épaisseur traversée ne dépassant pas quelques centimètres en présence d'un champ magnétique inférieur au Tesla.

Avantageusement, un laser à état solide selon l'invention est réalisé à partir d'une cavité monolithique comme indiqué sur la figure 5. Cette configuration présente plusieurs avantages.

La cavité peut alors être réalisée directement dans le matériau servant de milieu amplificateur. Les faces de la cavité peuvent être utilisées comme miroirs de la cavité ou comme faces de supports des miroirs de la cavité, ce qui facilite les opérations de réalisation et assure une plus grande stabilité géométrique et une meilleure tenue aux environnements thermiques et vibratoires. La figure 6 montre un schéma de réalisation d'un gyrolaser selon l'invention utilisant une cavité de ce type. Les miroirs 11, 12 et 13 sont directement déposés sur les faces de la cavité monolithique. Le matériau 19 de la cavité sert également de milieu amplificateur. Ce matériau est notamment à base de Néodyme-YAG (Yttrium – Aluminium – Grenat). Dans ce cas, le pompage optique est réalisé au moyen d'une diode laser 2 dont le faisceau 22 est focalisé à l'intérieur du milieu amplificateur au moyen d'une lentille 21.

30

La cavité monolithique peut également ne pas être planaire comme indiqué sur la figure 7. On obtient ainsi directement l'effet réciproque par la forme même de la cavité. Dans cet exemple, la cavité est une lame épaisse comportant deux faces planes et parallèles 195 et 196 entre elles et quatre faces latérales inclinées 191, 192, 193 et 194. La forme générale de

la lame est celle d'un coin tronqué. L'inclinaison des faces latérales est choisie de sorte que les faisceaux lumineux parcourent la cavité suivant un losange brisé comme indiqué sur la figure 7.

Un des autres avantages de la cavité monolithique est d'utiliser le milieu amplificateur 19 comme milieu à effet Faraday. Dans ce cas, l'obtention d'un champ magnétique variable est réalisée en entourant la cavité monolithique d'une bobine d'induction 73 comme illustré en figure 8a. Il est également possible, afin d'améliorer l'efficacité de l'effet Faraday, de n'entourer qu'une partie de la cavité avec une ou plusieurs bobines d'induction comme illustré en figure 8b, de manière à ce que le champ magnétique soit toujours parallèle à la direction de propagation. Dans ce cas, la cavité doit être percée pour laisser passer les fils électriques constituant les bobines d'induction.

Un champ magnétique fixe peut être obtenu en disposant sur la cavité monolithique des aimants permanents 74 comme illustré en figure 9.

Il est également possible de réaliser un gyrolaser selon l'invention à partir d'une cavité en fibres optiques. La figure 10 illustre ce principe. La cavité comprend essentiellement une fibre optique 100 en anneau, la fibre optique pouvant être en partie dopée pour agir comme milieu amplificateur. Toutes les géométries de fibres sont envisageables : à simple cœur, à double cœur (pour faciliter le couplage du faisceau de pompage optique), à maintien de polarisation. Des coupleurs Y 101 permettent d'extraire les deux faisceaux contre-propageants 5 et 6. Un troisième coupleur 101 permet d'injecter le faisceau optique de pompe 102 dans la fibre optique. Plusieurs techniques, notamment développées pour les télécommunications optiques, permettent d'effectuer ce couplage (technique dite en Vgroove, par exemple). Le pompage optique est réalisé, par exemple, par une diode laser de pompe, non représentée sur la figure 10.

L'effet optique réciproque peut être obtenu facilement, par exemple en appliquant à la fibre des déformations mécaniques locales, symbolisées par le rectangle 7. Les effets non réciproques peuvent également être obtenus par effet Faraday, symbolisés par le rectangle 8. Grâce au développement des technologies de télécommunication, il existe des isolateurs de Faraday tout fibrés, à entrée et sortie possédant un

connecteur à fibre optique. Ces isolateurs comprennent des éléments non réciproques qui font tourner la direction de polarisation de la lumière polarisée linéairement de 45°. Ces isolateurs peuvent être modifiés pour introduire une rotation non réciproque différente en modifiant soit leurs caractéristiques géométriques soit les champs magnétiques qui leur sont appliqués.



REVENDICATIONS

1. Gyrolaser comportant au moins une cavité optique (1) en anneau comprenant au moins trois miroirs (11, 12, 13), un milieu amplificateur (19) à l'état solide et un système d'asservissement (4, 42, 43),
5 la cavité (1) et le milieu amplificateur (19) étant tels que deux modes optiques (5, 6) dits contre-propageants peuvent se propager en sens inverse l'un de l'autre à l'intérieur de ladite cavité optique, le système d'asservissement permettant de maintenir la quasi-égalité d'intensité des
10 deux modes contre-propageants, le système d'asservissement comportant au moins, à l'intérieur de la cavité, un ensemble optique comprenant un élément polarisant (71), un dispositif à effet non réciproque (8) agissant sur l'état de polarisation des modes contre-propageants, caractérisé en ce que ledit ensemble optique comporte également un dispositif à effet réciproque
15 (7) agissant également sur l'état de polarisation des modes contre-propageants, le système d'asservissement comportant des moyens de réglage permettant de régler au moins l'un des effets desdits dispositifs (7) ou (8).
- 20 2. Gyrolaser selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'élément polarisant (71) est un polariseur linéaire.
- 25 3. Gyrolaser selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'élément polarisant (71) est au moins un des miroirs (11, 12, 13) de la cavité.
- 30 4. Gyrolaser selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'élément polarisant (71) est au moins soit une lame de verre inclinée, l'angle d'inclinaison sur les modes optiques (5, 6) étant alors environ égal à l'angle de Brewster, soit l'une des faces d'un élément de la cavité (7, 8 ou 19) taillée à l'incidence de Brewster.

5. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que, lorsque le dispositif à effet réciproque (7) est un second polariseur linéaire dont la direction de polarisation n'est pas parallèle à celle du premier polariseur, le système d'asservissement comporte des moyens permettant de régler l'effet non réciproque du dispositif à effet non réciproque (8).

6. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que, lorsque le dispositif à effet réciproque (7) est une lame optique biréfringente, le système d'asservissement comporte des moyens permettant de régler l'effet non réciproque du dispositif à effet non réciproque (8).

7. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que, lorsque la cavité optique est non planaire, le système d'asservissement comporte des moyens permettant de régler l'effet non réciproque du dispositif à effet non réciproque (8).

8. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le dispositif à effet réciproque (7) est une lame optique à biréfringence électriquement contrôlée.

9. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que, lorsque le dispositif à effet non réciproque (8) comprend un matériau à effet Faraday polarisé par un aimant permanent, le système d'asservissement comporte des moyens permettant de régler l'effet réciproque du dispositif à effet réciproque (7).

10. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le dispositif à effet non réciproque (8) comprend un matériau à effet Faraday polarisé par une bobine d'induction (73) commandée par une intensité électrique réglable.

11. Gyrolaser selon les revendications 9 ou 10, caractérisé en ce que le milieu amplificateur et le matériau à effet Faraday sont réalisés dans le même matériau.

12. Gyrolaser selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la cavité (1) est monolithique, les modes optiques (5, 6) dits contre-propageants se propageant, à l'intérieur de la cavité, 5 uniquement dans un matériau solide.

13. Gyrolaser selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le milieu amplificateur (19) est à base de Néodyme-YAG (Yttrium - Aluminium - Grenat).

10 14. Gyrolaser selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le pompage optique de la cavité (1) est assuré par au moins une diode laser (2).

15 15. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que la cavité comprend au moins une fibre optique (100) en anneau comportant des coupleurs optiques (101) permettant l'entrée et la sortie des faisceaux contre-propageants et d'au moins un faisceau optique de pompage optique (102).

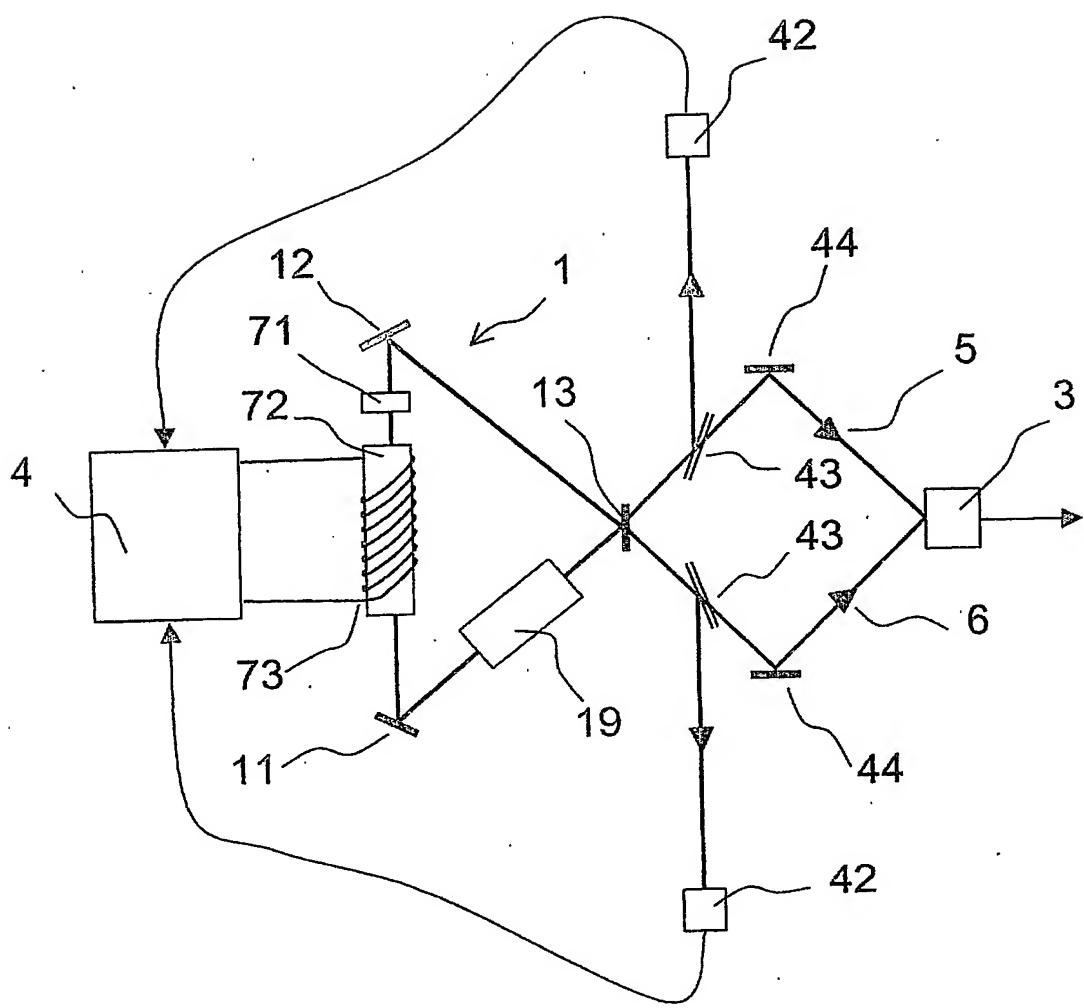


FIG. 1

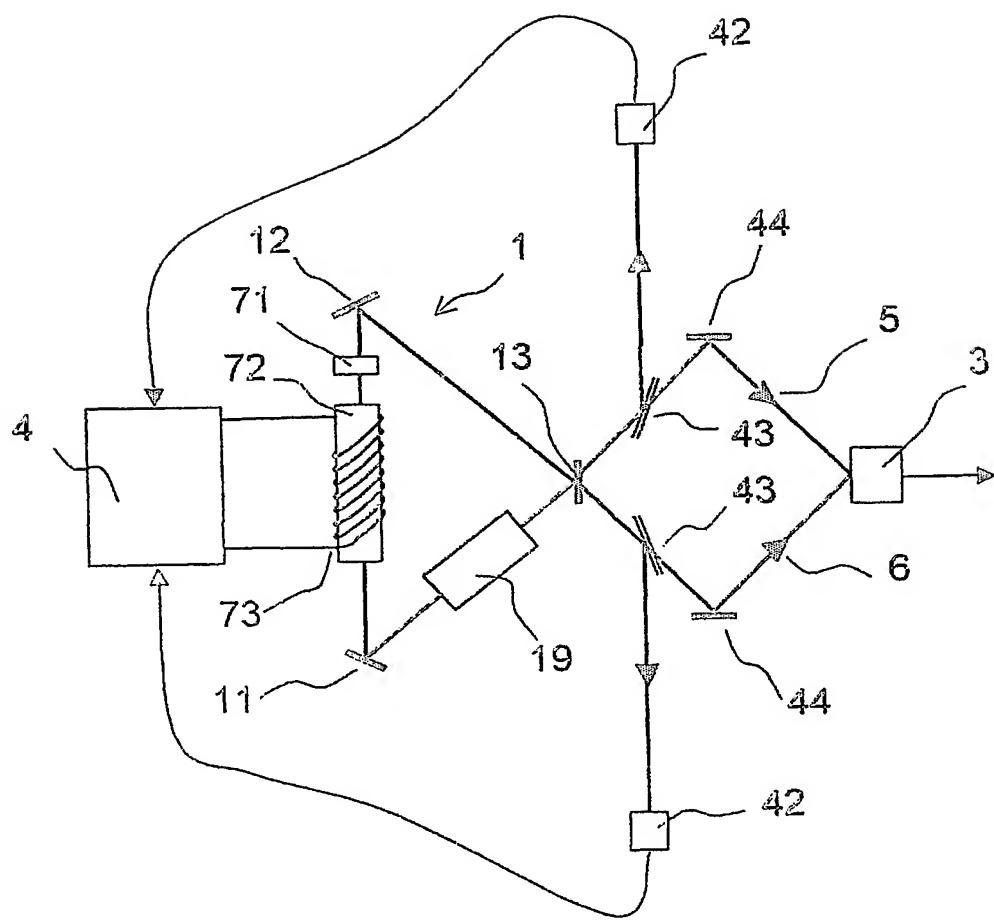


FIG.1

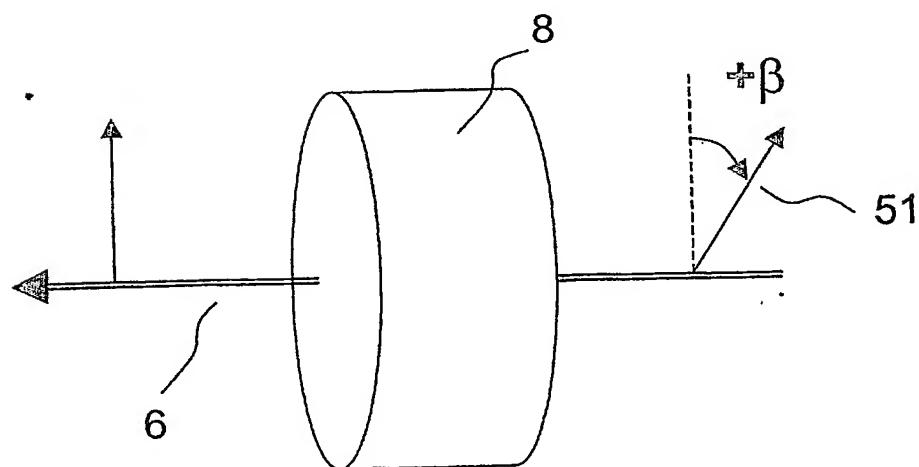
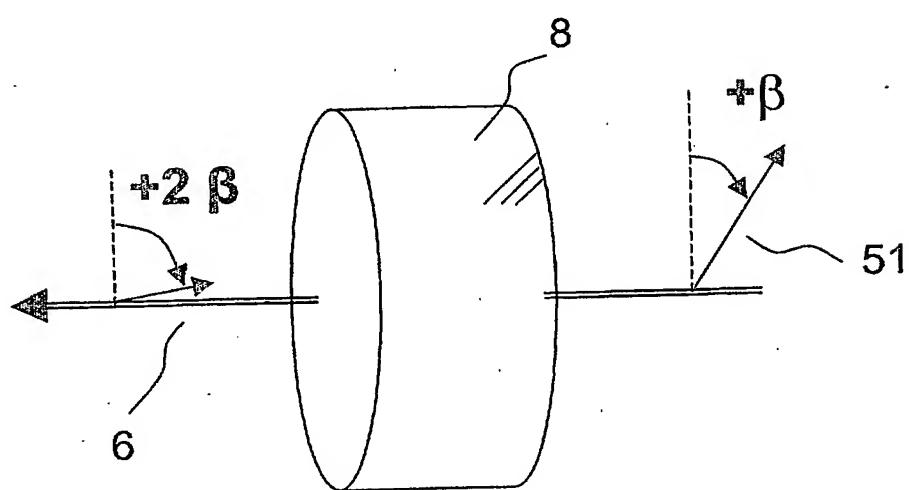
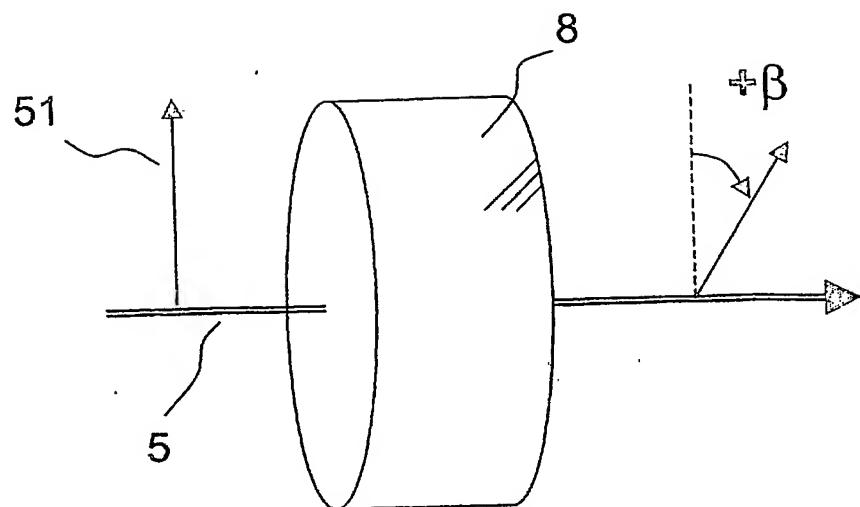


FIG. 2a

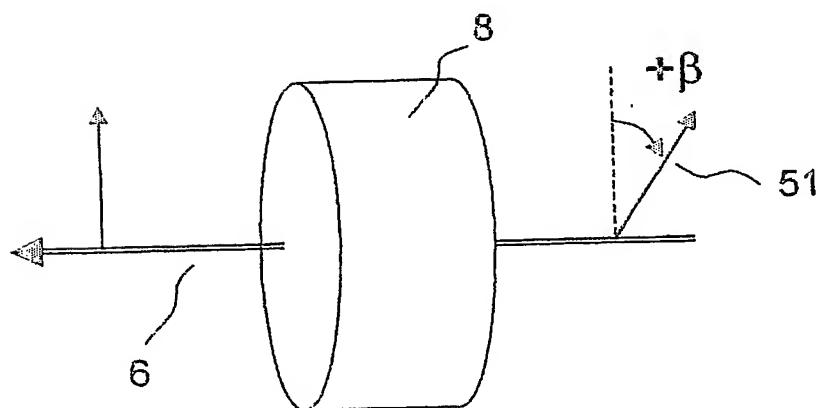
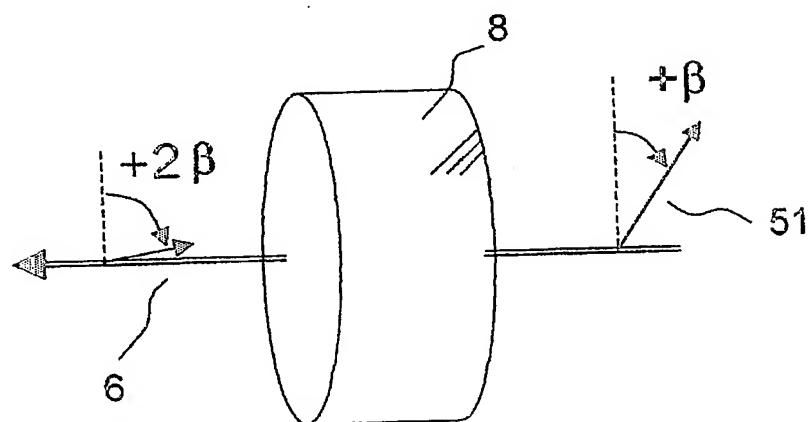
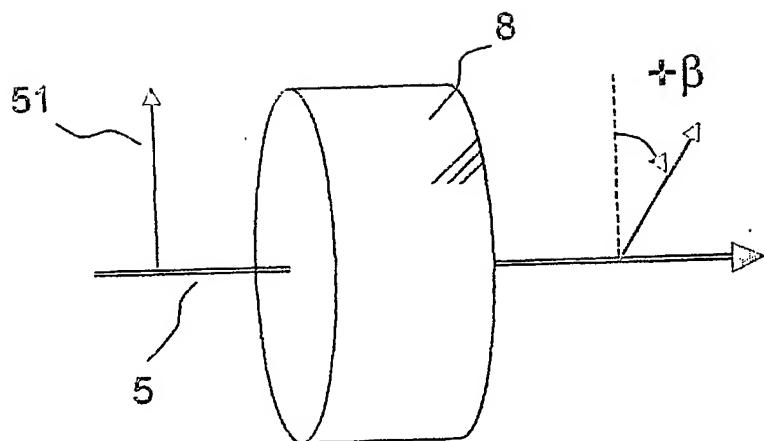


FIG.2a

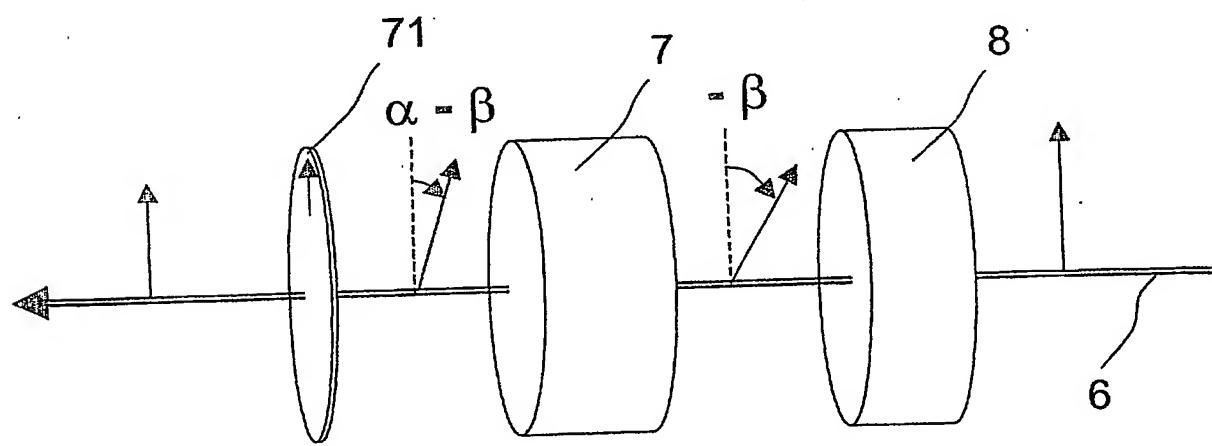
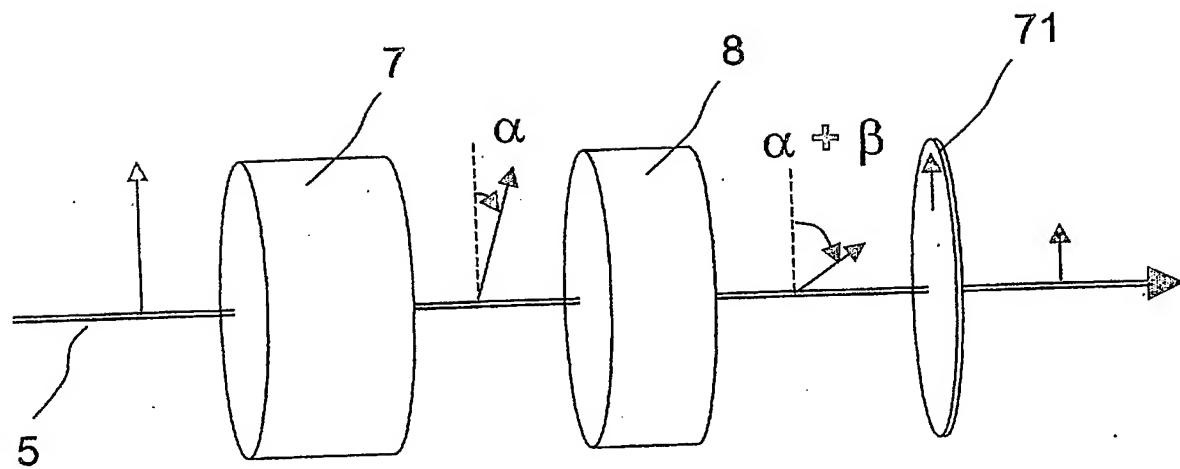


FIG. 2b



3/11

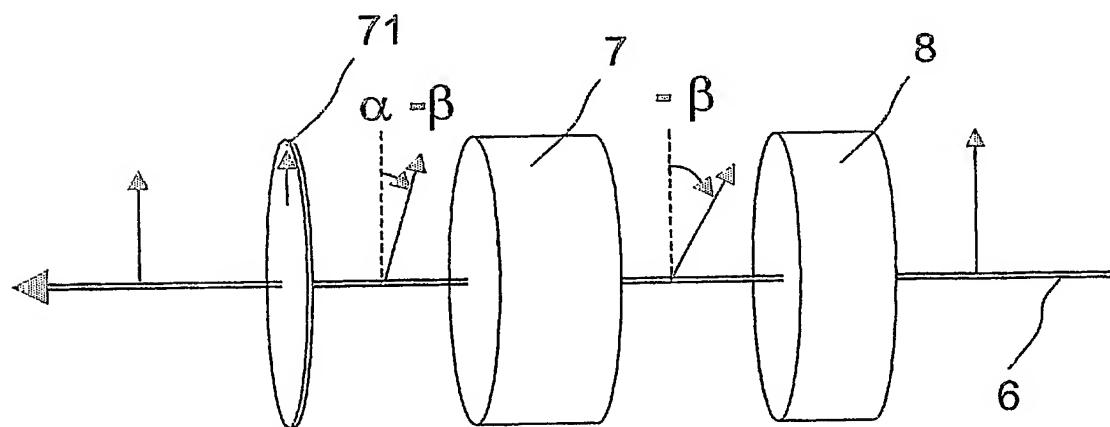
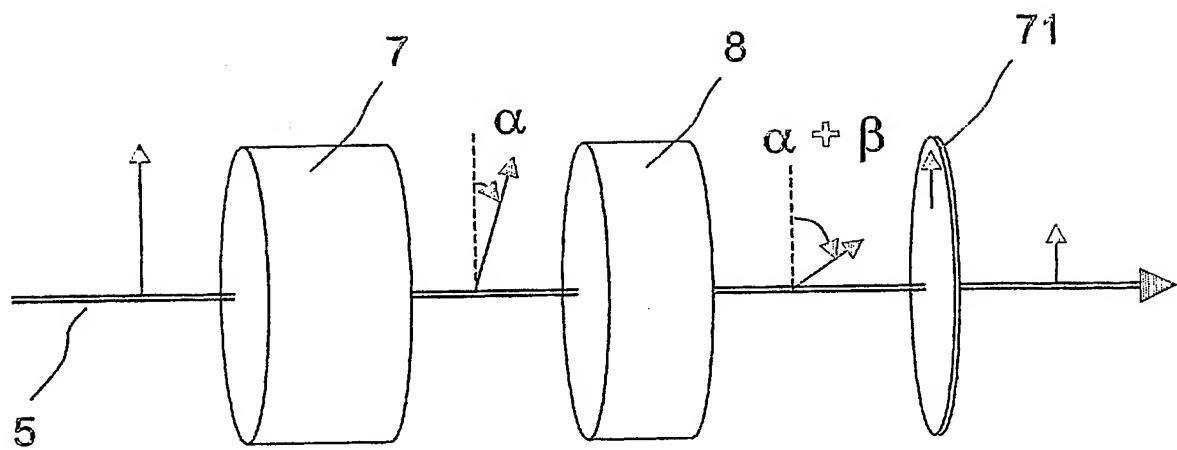


FIG.2b

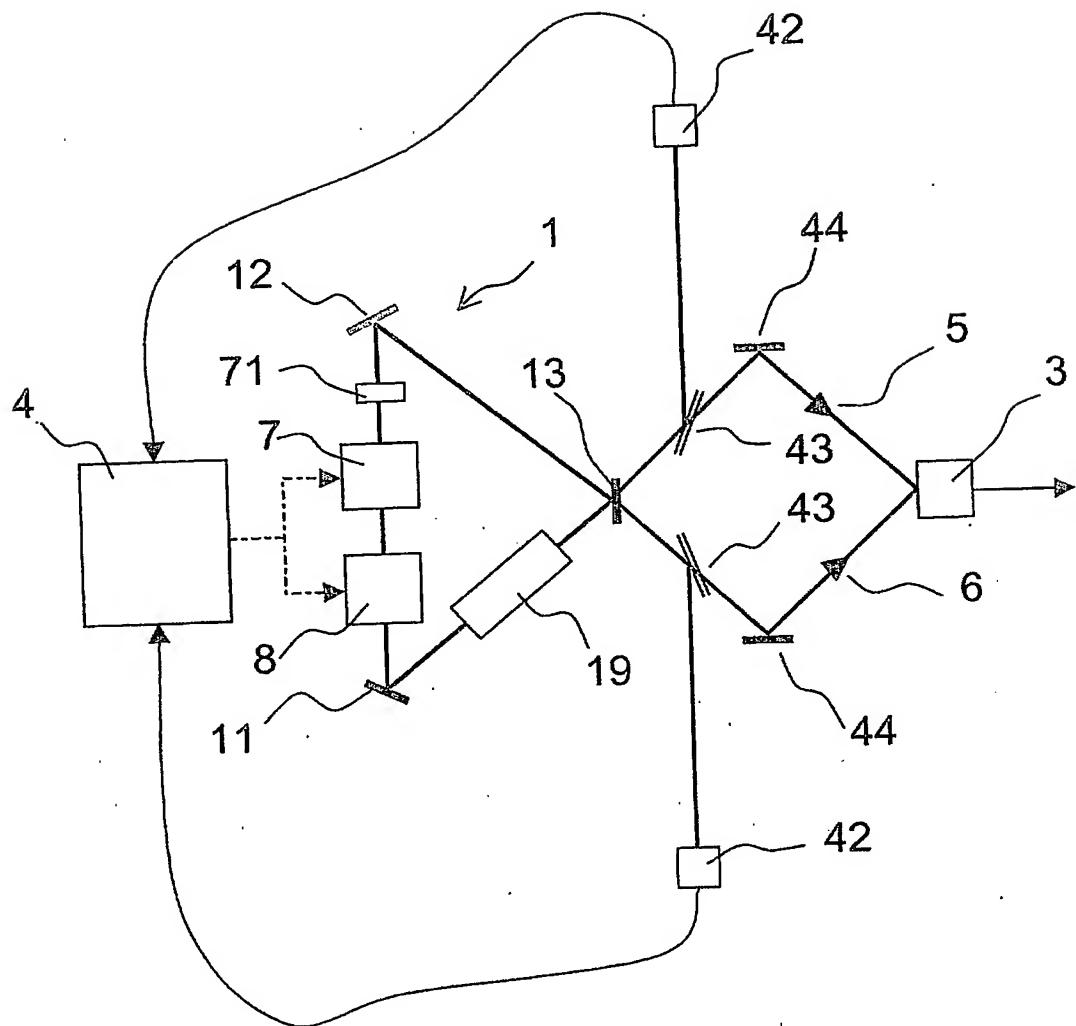


FIG. 3



4/11

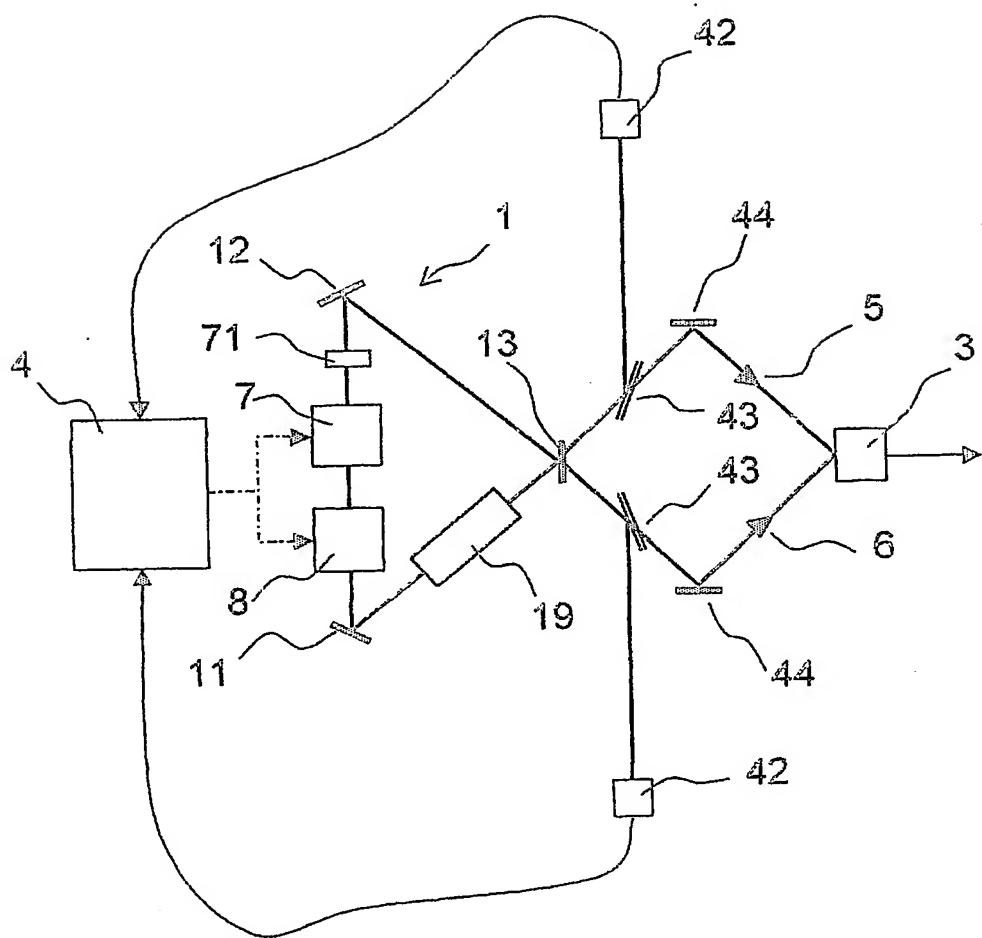


FIG.3

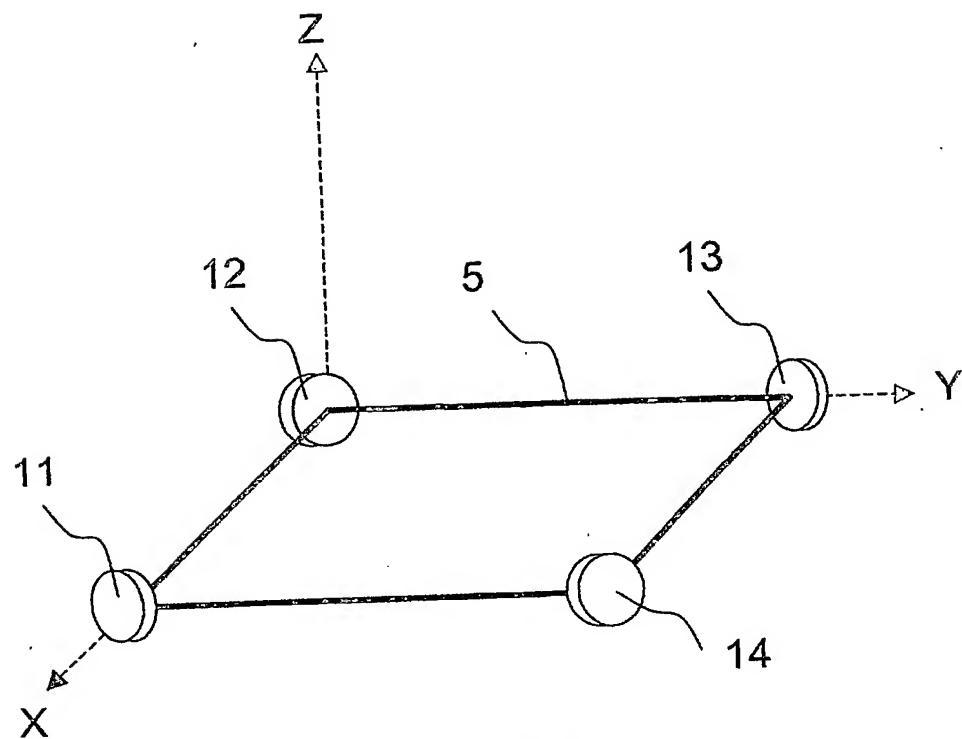


FIG. 4a

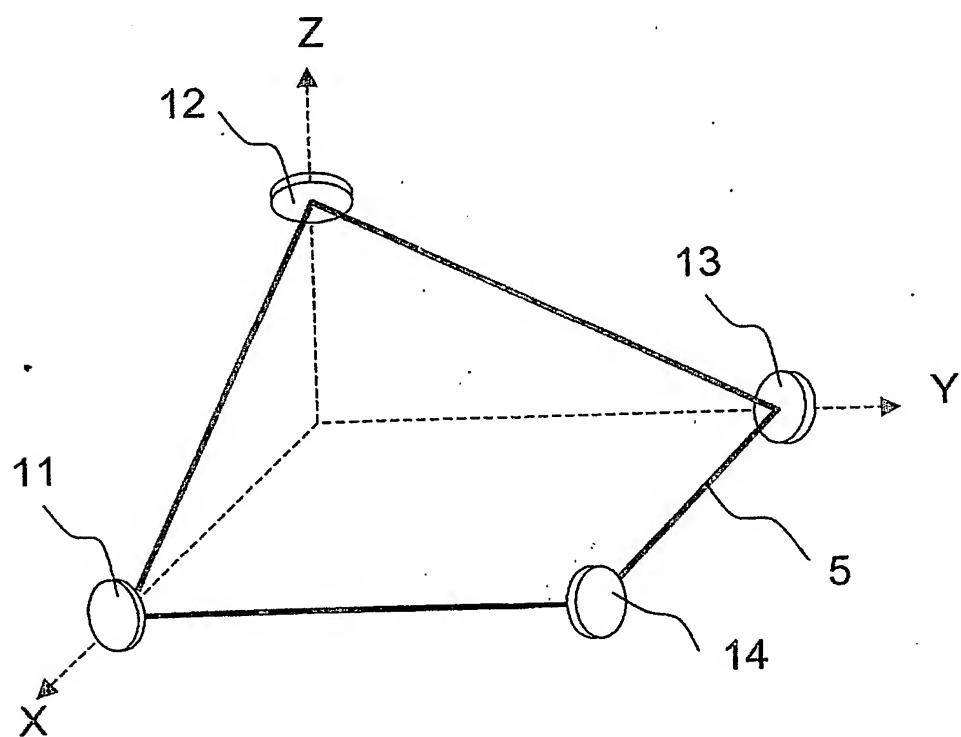
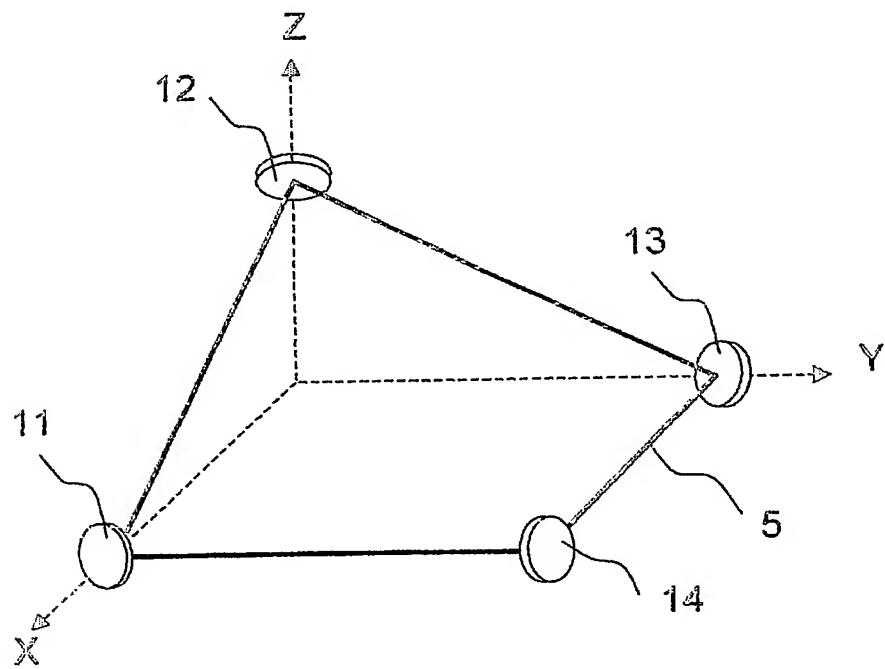
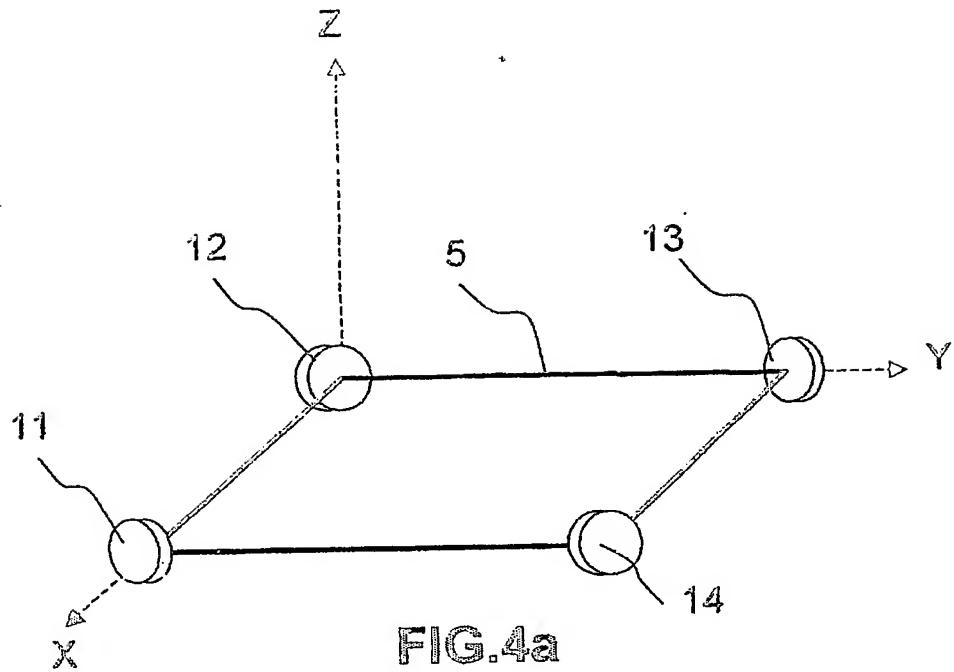


FIG. 4b



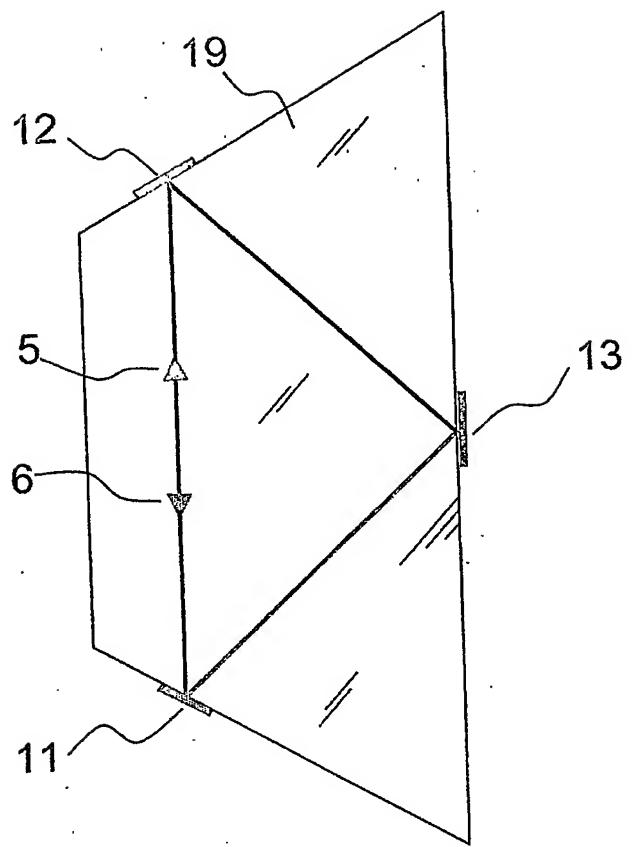


FIG. 5

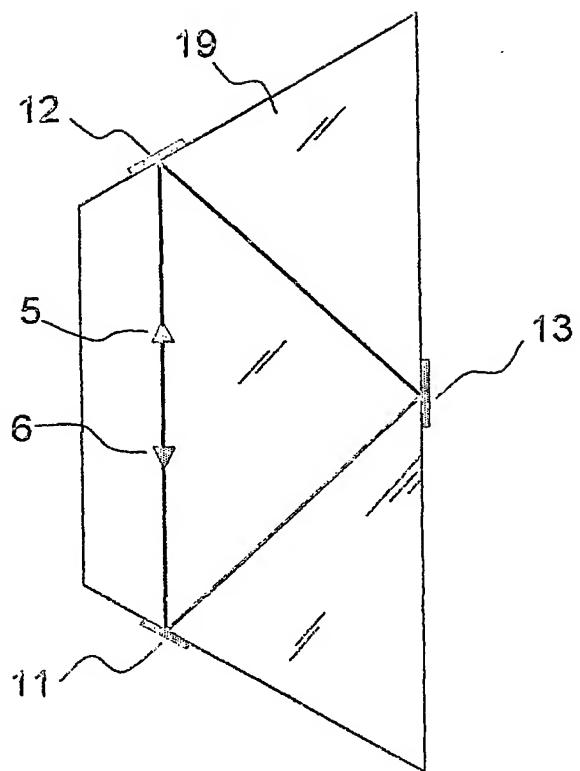


FIG.5

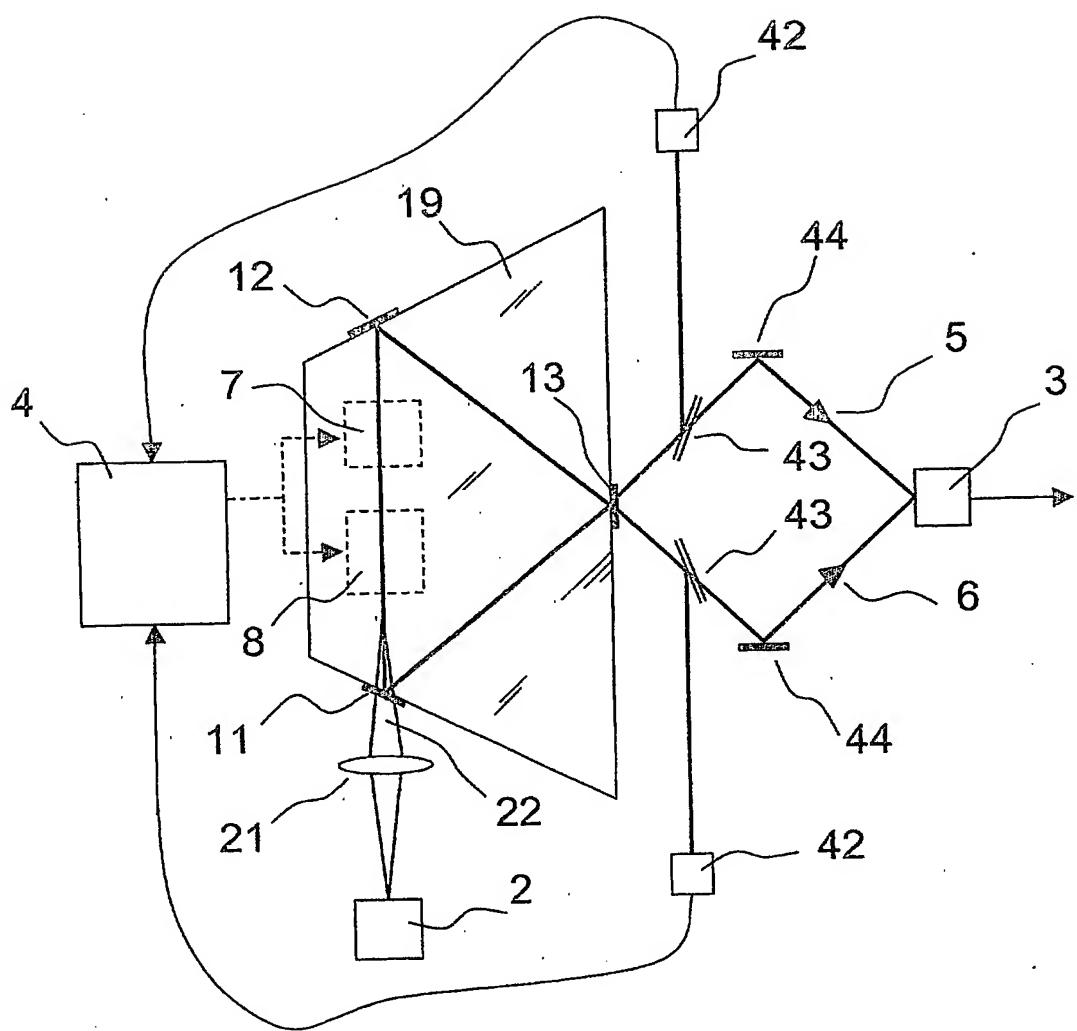


FIG. 6

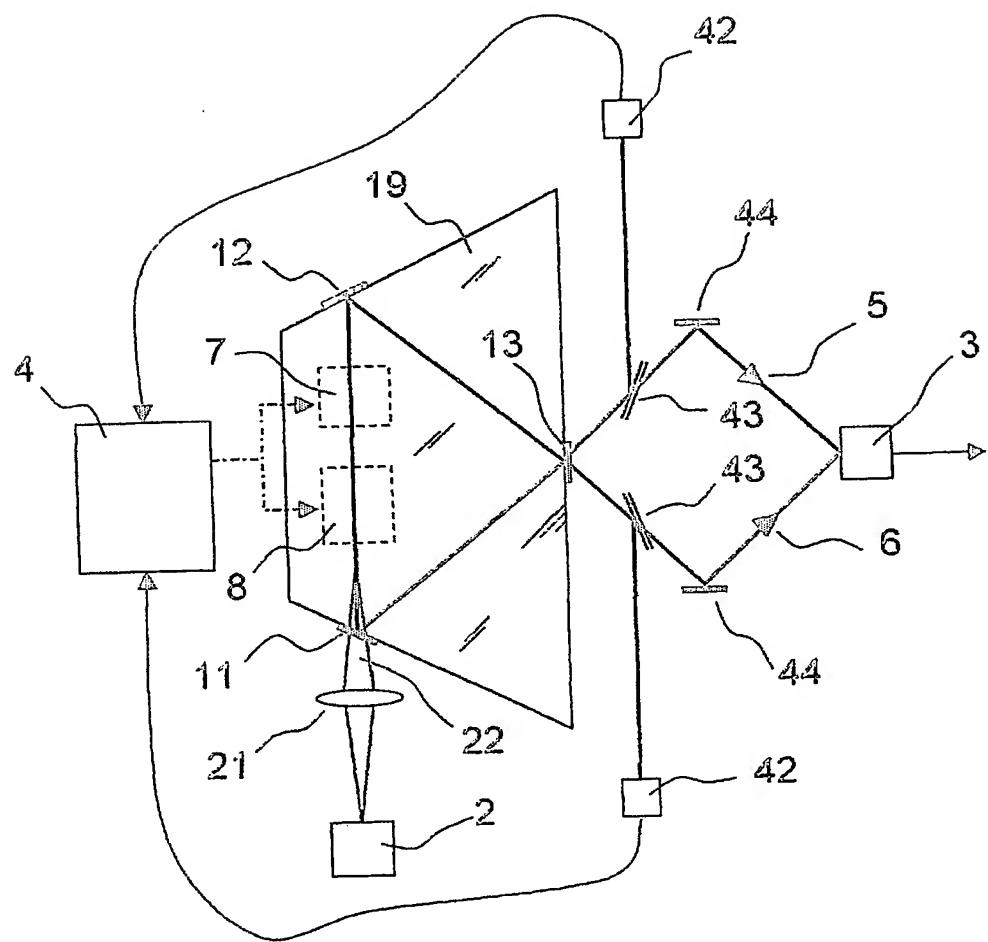
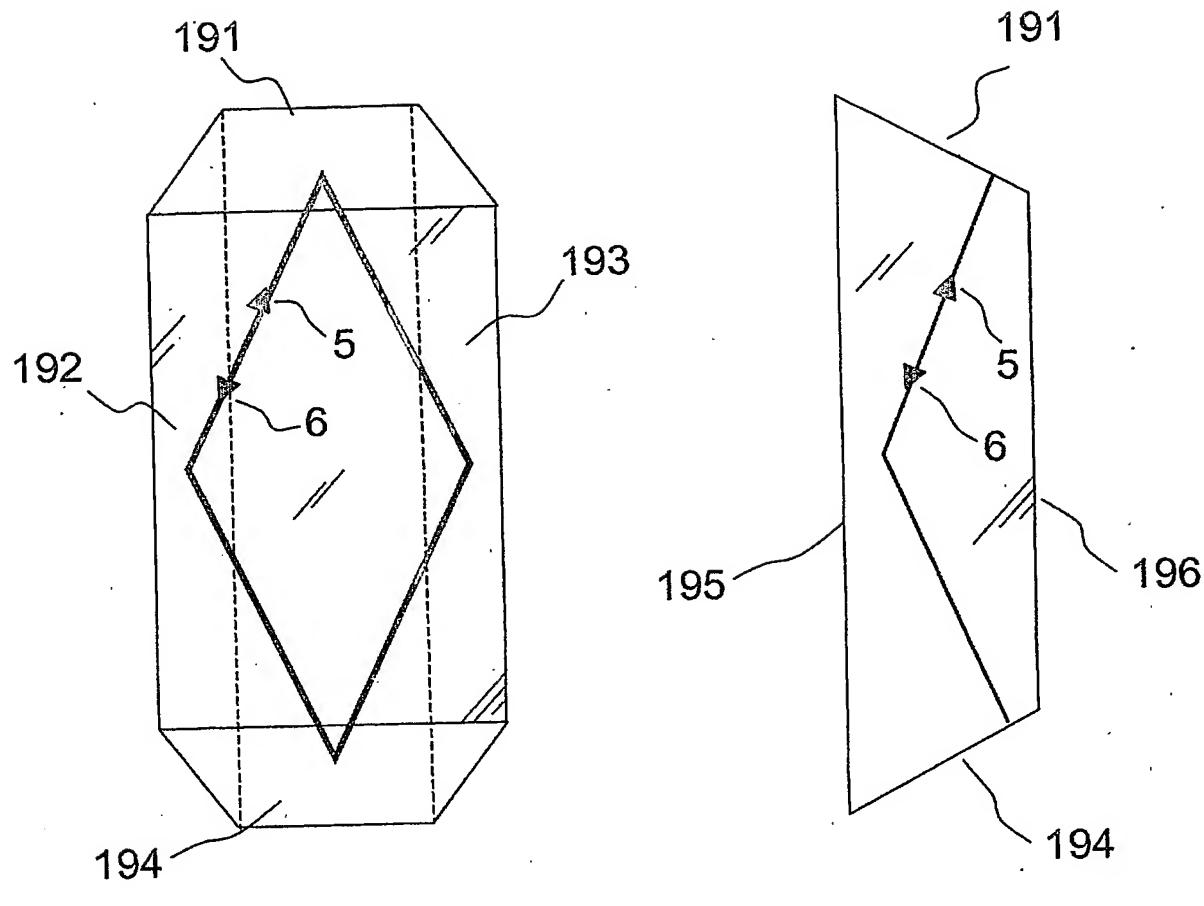


FIG. 6



VUE DE FACE

VUE DE COTE

FIG. 7

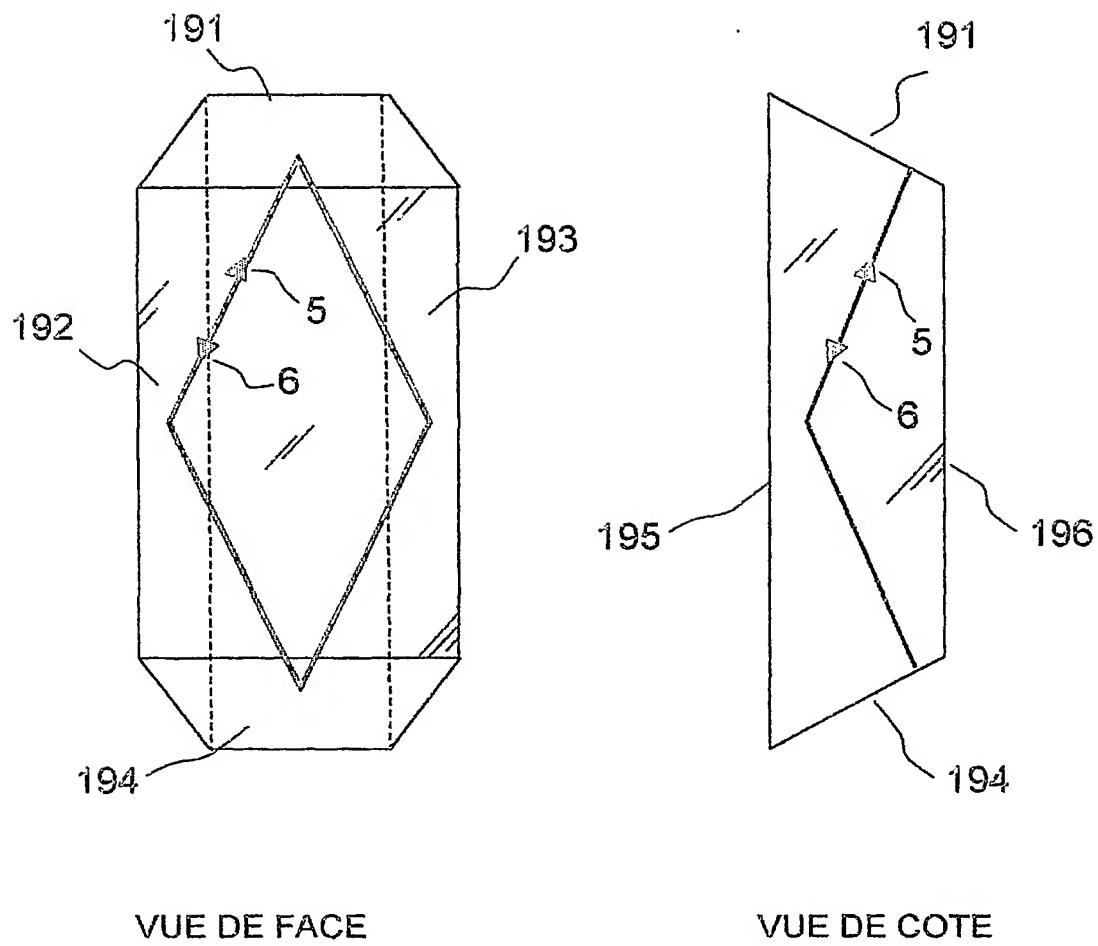


FIG.7

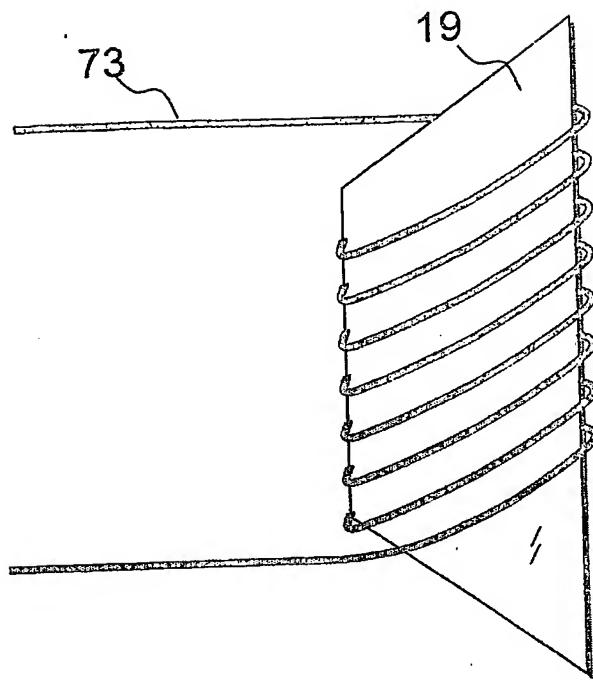


FIG. 8a

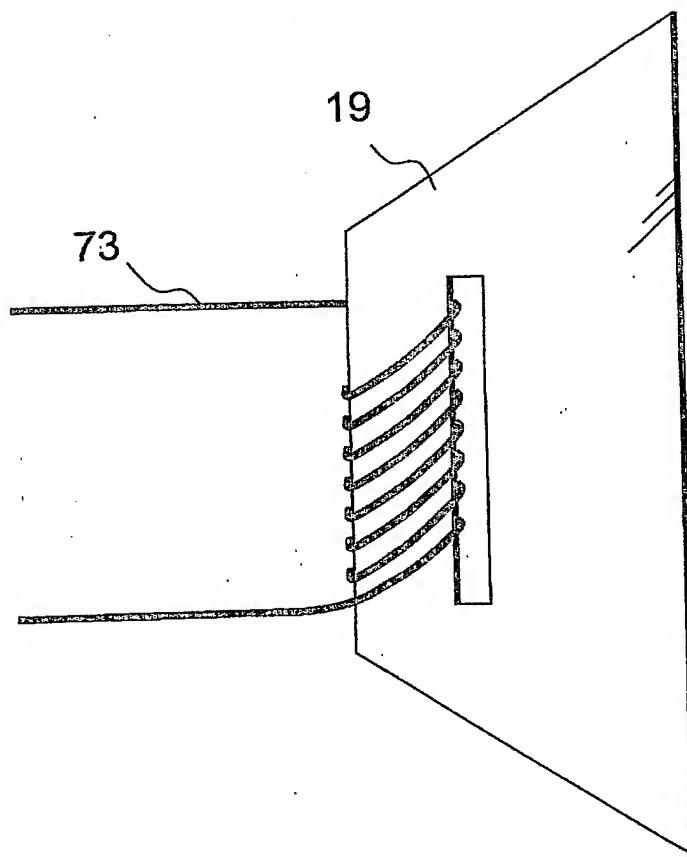


FIG. 8b

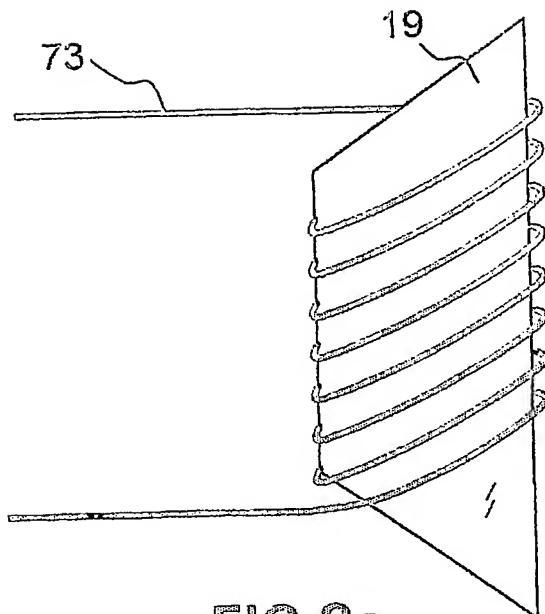


FIG. 8a

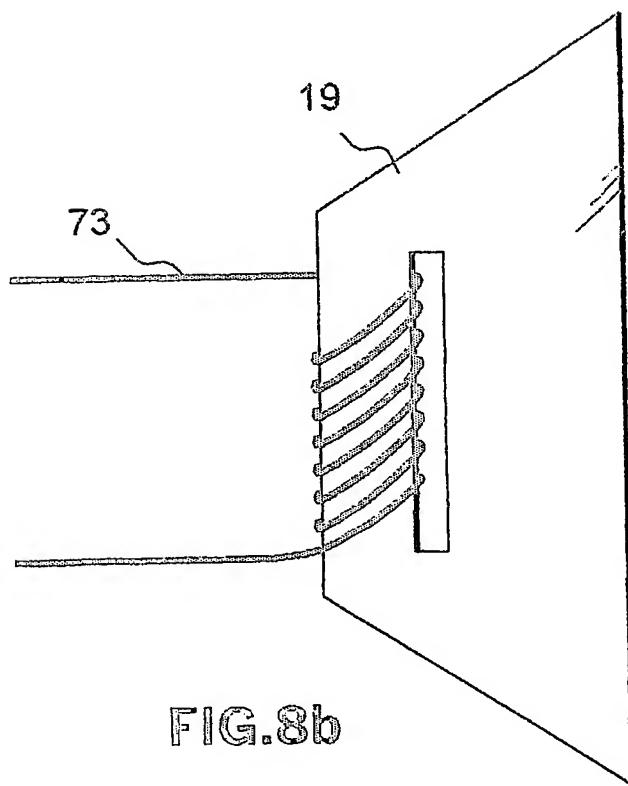


FIG. 8b

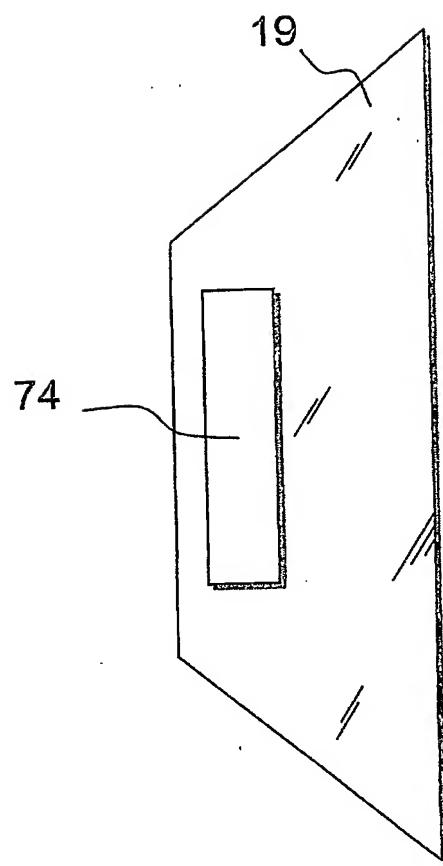


FIG. 9



10/11

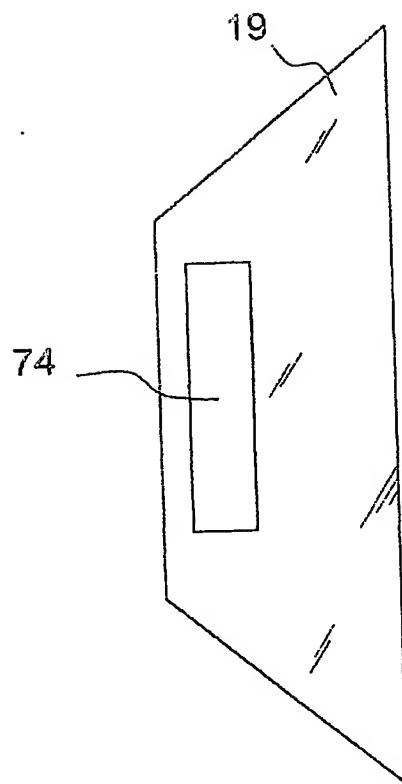


FIG.9

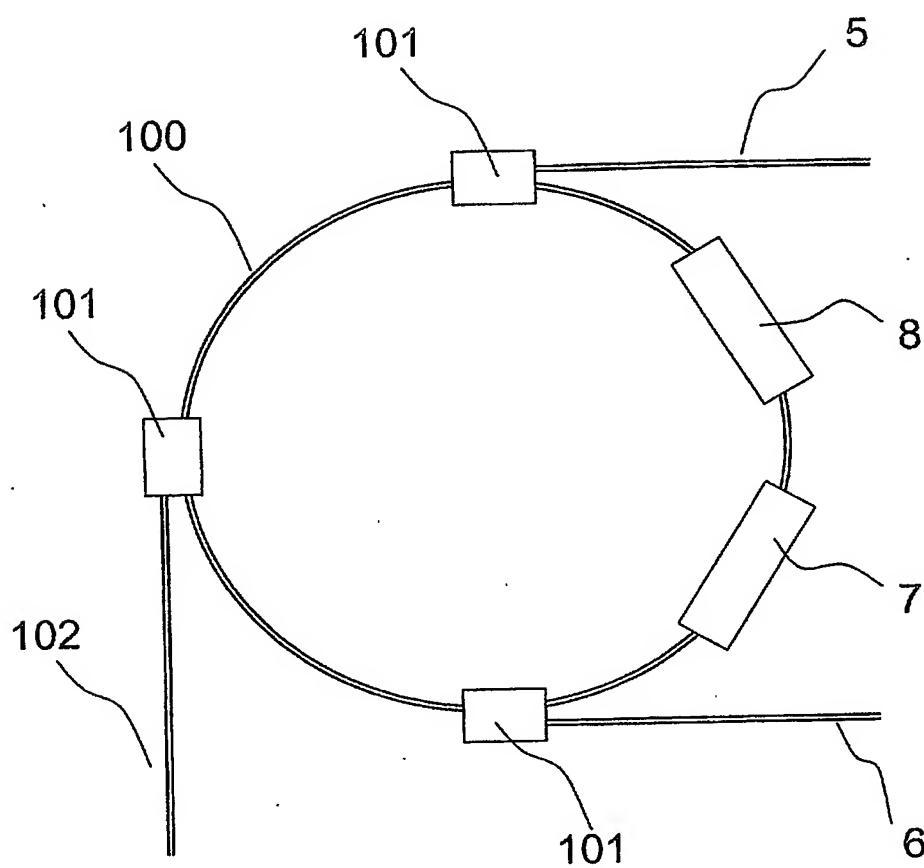


FIG. 10

44/11

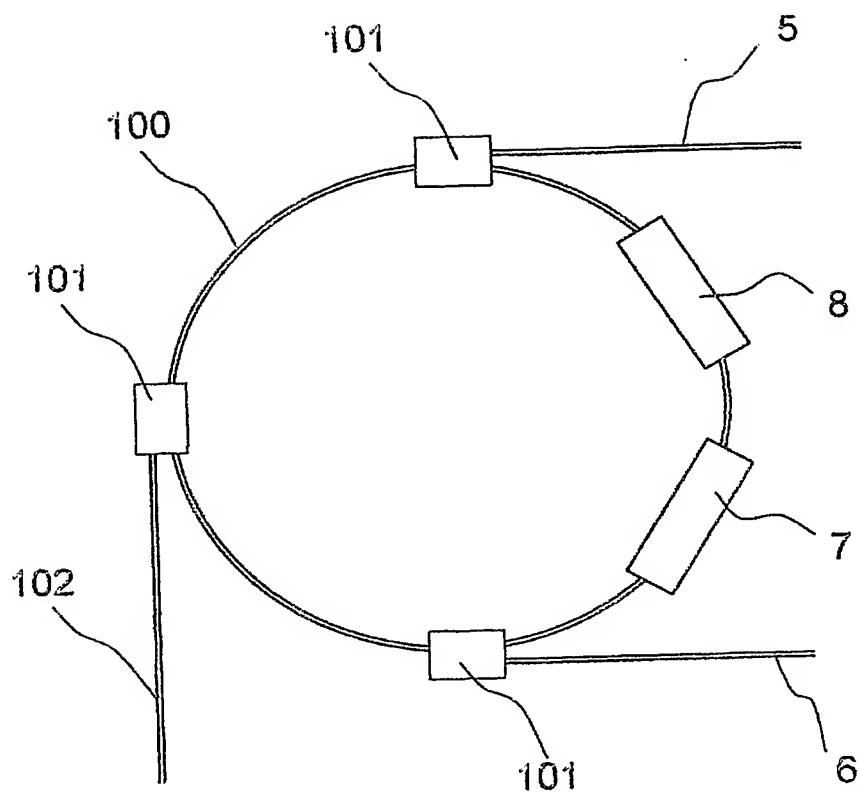


FIG.10



BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI

DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 93 59 30

DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S) Page N° 1.. / 1..
(Si le demandeur n'est pas l'inventeur ou l'unique inventeur)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 W /260899

Vos références pour ce dossier (facultatif)	63012	
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL	0303645	
TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)		
GYROLASER A ETAT SOLIDE STABILISE		
LE(S) DEMANDEUR(S) :		
THALES		
DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) : (Indiquez en haut à droite «Page N° 1/1» S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez un formulaire identique et numérotez chaque page en indiquant le nombre total de pages).		
Nom		SCHWARTZ
Prénoms		Sylvain
Adresse	Rue	THALES INTELLECTUAL PROPERTY 31-33 avenue Aristide Briand
	Code postal et ville	94117 ARCUEIL CEDEX
Société d'appartenance (facultatif)		
Nom		FEUGNET
Prénoms		Gilles
Adresse	Rue	THALES INTELLECTUAL PROPERTY 31-33 avenue Aristide Briand
	Code postal et ville	94117 ARCUEIL CEDEX
Société d'appartenance (facultatif)		
Nom		POCHOLLE
Prénoms		Jean-Paul
Adresse	Rue	THALES INTELLECTUAL PROPERTY 31-33 avenue Aristide Briand
	Code postal et ville	94117 ARCUEIL CEDEX
Société d'appartenance (facultatif)		
DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)		
Sophie ESSELIN		

PCT/EP2004/050349



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER: _____**

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.